

На правах рукописи



Худяков Павел Юрьевич

**ГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ СОУДАРЕНИИ
ПРЯМОТОЧНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ**

Специальность: 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена на кафедре теоретической теплотехники ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Жилкин Борис Прокопьевич

Официальные оппоненты: Вавилов Владимир Платонович, доктор
технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», заведующий
лабораторией научно-исследовательского
института интроскопии;

Звонарев Константин Валериевич, кандидат
физико-математических наук, ФГАОУ ВПО
«Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н.Ельцина»,
доцент кафедры технической физики.

Ведущая организация: ФГБУН Институт теплофизики Уральского
отделения РАН, г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится **1 ноября 2013 года в 15:00** на заседании
диссертационного совета Д 212.285.02 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по
адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, аудитория I главного учебного
корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан «_____» сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физ.-мат. наук, доцент

Г.И. Пилипенко

Актуальность темы (проблемы). Газовые струйные течения, в частности соударяющиеся низкотемпературные струи и факелы, широко применяются в различных промышленных технологиях. Исследованию их главным образом газодинамических свойств посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ, базирующихся, как правило, на квазистационарном подходе к описанию явлений переноса.

При изучении соударяющихся струй большинство авторов уделяет основное внимание итоговому, результирующему течению, и лишь в отдельных работах рассматриваются вопросы формирования области соударения, хотя именно из нее проистекает результирующий поток. В литературе практически отсутствуют сведения о закономерностях теплообмена в области соударения, не раскрыт механизм теплопереноса при соударении струй.

Для решения задач изучения области ударного взаимодействия, а также для разработки способов количественной оценки характеристик теплообмена при смешении потоков необходимо применение иных, по сравнению с ранее использованными, методов исследования, позволяющих получать информацию о мгновенном поле значений характеристических величин.

Кроме того, применение в промышленности таких полевых методик открывает перспективу создания новых способов управления энергетическими агрегатами, использующими соударяющиеся газовые потоки, что позволит повысить точность и качество управления технологическим процессом.

Цель работы в теоретическом аспекте состояла в том, чтобы разработать полевую методику идентификации структур в области взаимодействия соударяющихся струй, создать способы количественной оценки теплообмена при соударении струй с разной температурой и способы расчета теплонапряженности зоны взаимодействия для равнонагретых высокотемпературных потоков.

В практическом плане ставилась задача разработать на основе данных о динамике теплопереноса новую концепцию автоматизированного управления технологическими процессами, в которых применяются соударяющиеся газовые струи и факелы.

Объекты исследований. В целях достижения общности методов исследования и последующих представлений были выбраны течения газов,

заведомо обладающие различными исходными свойствами: низко- и высокотемпературные соударяющиеся газовые струи.

Научная новизна основных положений работы заключается в том, что автором впервые:

- разработан полевой метод определения границ и идентификации термической структуры области соударения газовых потоков;
- обнаружены режимы термомеханического взаимодействия потоков, значительно отличающиеся от существующих представлений;
- выявлено, что режим термомеханического взаимодействия потоков определяющим образом зависит от безразмерной разности температур соударяющихся течений;
- разработан метод количественной оценки теплопереноса при встречном взаимодействии потоков с разной температурой;
- найдена зависимость изменения характеристик теплообмена соударяющихся струй от различных факторов;
- разработана методика анализа локальной теплонапряженности в зоне столкновения факелов;
- предложен способ быстродействующего фазочастотного анализа соударяющихся факелов, позволяющий уточнить сведения о структуре потока;
- разработаны методики комплексного вейвлет-анализа, непрерывного и дискретного вейвлет-анализа и метод анализа главных компонент для идентификации структурных образований в свободных и соударяющихся факелах;
- установлено, что в газовых факелах существуют структурные области, в которых температура при одинаковой частоте пульсирует в разных фазах;
- создана промышленная методика, позволяющая установить границы факела на фоне технологической поверхности и распознать возникающие в нем структурные образования;
- предложены практические методики регистрации наличия в рабочем пространстве газовых струй и определения координат области их взаимодействия;
- разработан способ управления местоположением области взаимодействия газовых струй.

Достоверность результатов основывается на надежности экспериментальных данных, полученных сочетанием независимых методик исследования и подтвержденных воспроизводимостью результатов измерений, их хорошим согласованием на уровне тестовых опытов с данными других авторов, а также применением комплекса современных методов исследования, подбором измерительной аппаратуры, ее систематической поверкой и тарировкой.

Практическая значимость заключается:

- в определении характеристик теплообмена при соударении прямооточных газовых струй и обобщение их в виде критериального уравнения, что может быть применено в инженерных расчетах;
- в разработке методики тепловизионного определения области взаимодействия струй в промышленных условиях, реализация которой (полезная модель) защищена патентом РФ;
- в создании алгоритма и принципиальной схемы автоматизированного управления положением области взаимодействия факелов в рабочем пространстве энергетических агрегатов на основе тепловизионного сканирования топочного пространства;
- в создании методики, позволяющей определять локальную теплонапряженность при взаимодействии факелов и тем самым оценить интенсивность процессов в зоне соударения.

Автор защищает:

- методику идентификации термической структуры течения в области взаимодействия соударяющихся прямооточных газовых потоков и полученные с ее помощью сведения о структурных образованиях в этой зоне;
- методику количественной оценки теплопереноса при взаимопроникновении встречных газовых течений и экспериментальные данные по теплообмену соударяющихся прямооточных газовых струй в зависимости от параметров струйной системы;
- методику идентификации структурных образований в отдельном факеле и системах факелов;
- способ определения координат расположения области взаимодействия факелов в топочном пространстве энергетического агрегата.

Личный вклад автора состоит в том, что им на основе анализа литературных источников поставлены задачи исследования, разработаны основные методики, спроектированы и отлажены экспериментальные установки, проведены опыты, обработаны и проанализированы полученные экспериментальные данные, а также предложены пути практической реализации полученных сведений в промышленности.

Автором разработана методика оценки теплового взаимодействия и теплонапряженности области соударения газовых потоков, а также методики Фурье-анализа и вейвлет-анализа последовательностей термограмм с целью выявления турбулентных структур в потоке.

Апробация работы. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и были представлены на: XVIII всероссийской научно-практической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2012); на VIII международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия - 2013» (Иваново, 2013); на семинарах в Институте теплофизики УрО РАН (Екатеринбург, 2013).

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ и получен патент РФ на полезную модель, в т.ч. 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, и 2 статьи в международных рецензируемых журналах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 121 наименование, и приложений. Диссертация изложена на 129 страницах и снабжена 75 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы выбор направления исследований и его цели, показана актуальность проблемы, определен круг задач исследований, обозначены научная и практическая значимость полученных результатов, приведены главные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** содержится аналитический обзор литературных источников, посвященных современным задачам и методам исследования структурных образований как в низко-, так и в высокотемпературных газовых потоках, и установлению их роли в процессах тепломассообмена. Обосновывается

необходимость обеспечения быстросействующего оперативного контроля полевых характеристик течения и рациональность построения на этой базе систем управления факельными процессами в топках технологических агрегатов.

Исходя из анализа литературных источников и учитывая цель работы, были сформулированы следующие задачи исследования:

- разработать полевой метод идентификации термической структуры и определения границ области соударения газовых потоков;
- определить основные закономерности формирования термической структуры области соударения;
- разработать метод количественной оценки теплопереноса при взаимодействии потоков;
- установить зависимости изменения характеристик теплообмена соударяющихся струй от различных факторов;
- создать методику анализа локальной теплонапряженности в зоне столкновения факелов;
- разработать метод фазочастотного анализа структуры потока;
- предложить промышленную методику, позволяющую установить границы факела на фоне технологической поверхности и распознать возникающие в нем структурные образования;
- создать инженерные методики определения координат области взаимодействия и наличия газовых струй;
- разработать способ управления положением области взаимодействия газовых струй.

Во **второй главе** рассмотрены вопросы методики идентификации термической структуры и её аппаратной реализации, обсуждаются закономерности структурообразования в области соударения низкотемпературных газовых струй, а также строение свободных и соударяющихся факелов, образующихся при сжигании газового топлива. При тепловизионном определении мгновенных температурных полей для слабоизлучающих низкотемпературных потоков использовался метод термовизуализирующей сетки, который заключается в размещении в потоке сетки

из нитей, число Bi для которых стремится к бесконечности, и тем самым обеспечивается мгновенное следование температуры поверхности нитей сетки за температурой потока. Для факелов, интенсивность излучения которых достаточно велика, съемка тепловизором производилась прямым способом. Метод идентификации структур в потоке базировался на анализе полевых распределений *стандартного отклонения, частоты и фазы пульсации температуры*.

Обсуждаются эффекты образования и развития структур в струйных течениях.

Исследования прямооточных соударяющихся *воздушных струй* проводились на установке, изображенной на рис. 1.

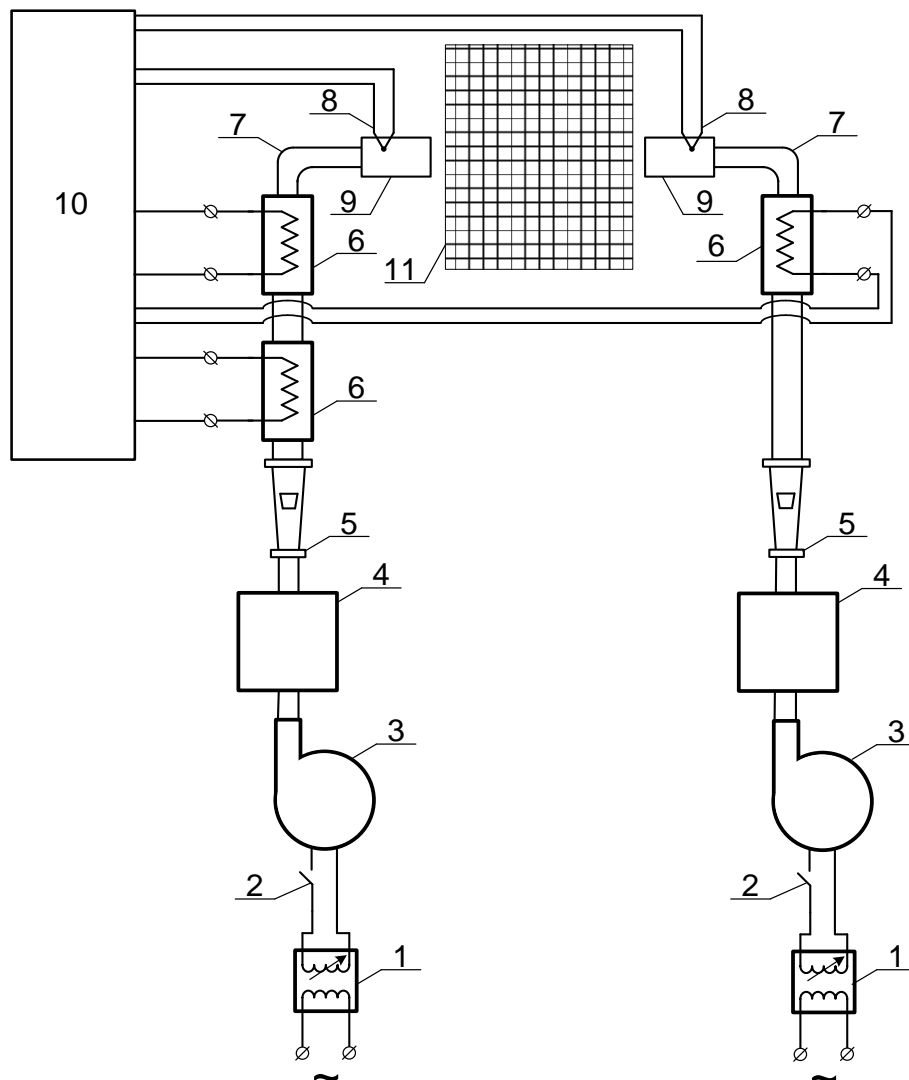


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – автотрансформатор; 2 – выключатель; 3 – дутьевой вентилятор; 4 – демпфирующий бак; 5 – ротаметр; 6 – воздухоподогреватель; 7 – соединительный патрубок; 8 – термопара; 9 – сопло; 10 – система автоматического управления нагревом воздуха; 11 – сетка-преобразователь температуры

Общий вид рабочего участка установки показан на рис. 2.

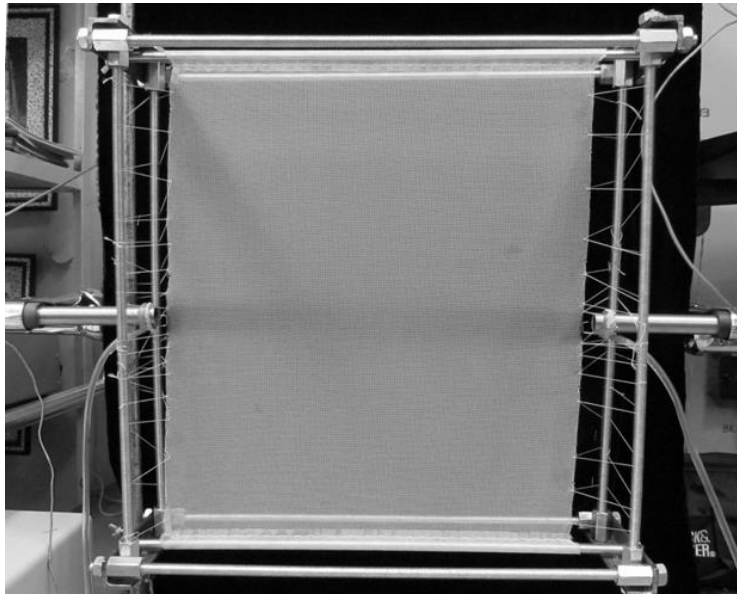


Рис. 2. Вид рабочего участка установки

Тип струйного аппарата: труба круглого поперечного сечения с внутренним диаметром $d = 16...32$ мм. Параметры струйной системы: скорость потока $w_o = 12...90$ м/с, температура струи $t_{стр} = 23...65$ °С, температура окружающей среды $t_{oc} = 18...26$ °С, расстояние между соплами $l = (10...25) d$.

При проведении экспериментов рабочий участок ограничивался экранами во избежание посторонних тепловых засветок.

Максимальная случайная погрешность измерения температуры газового потока составила 5,1 %, частоты пульсации температуры – 5,3 %, стандартного отклонения температуры – 5,4 %.

Описание процедуры эксперимента. При наступлении стационарного режима снимался тепловизионный фильм с частотой 30 кадров в секунду при помощи тепловизора NEC TH-9100, оптическая ось которого была перпендикулярна сетке-преобразователю. Фильм обрабатывался отрезками по 17 секунд, которые представляли собой трехмерный массив размерностью 240x320x512, где 240x320 – разрешение матрицы тепловизора, а 512 – количество кадров в отрезке фильма.

Затем осуществлялась процедура идентификации структур. Под структурой понимался такой элемент в области взаимодействия струй, где контрольный параметр – температура – изменялся по единым стохастическим закономерностям. В качестве стохастических характеристик использовались

распределения стандартного отклонения температуры S_t (для низкотемпературных струй), а также частоты f и фазы φ пульсации температуры (для высокотемпературных струй).

При вычислении S_t для каждой точки (пикселя) тепловизионной матрицы строился временной ряд, состоящий из 512 элементов. Для каждой точки матрицы вычислялось *стандартное отклонение*, затем полученные значения сводились в итоговую таблицу размерностью 240x320, которая визуализировалась цветом.

Эти же временные ряды (каждый по отдельности) далее обрабатывались при помощи процедуры быстрого преобразования Фурье, в результате чего для каждой точки получались графики изменения спектральной плотности мощности вариаций температуры (собственный спектр) $ST(f)$. В каждом спектре определялась характерная частота f_m , соответствующая максимальному значению спектральной плотности ST_m . Затем, как и в случае с распределением ST , полученные значения f_m также сводились в итоговую таблицу, которая визуализировалась цветом.

В результате было обнаружено, что в зоне соударения существуют области, во всех контрольных точках (пикселях) которых значение стандартного отклонения S_t температуры значительно превышает среднее по термограмме (рис. 3,б).

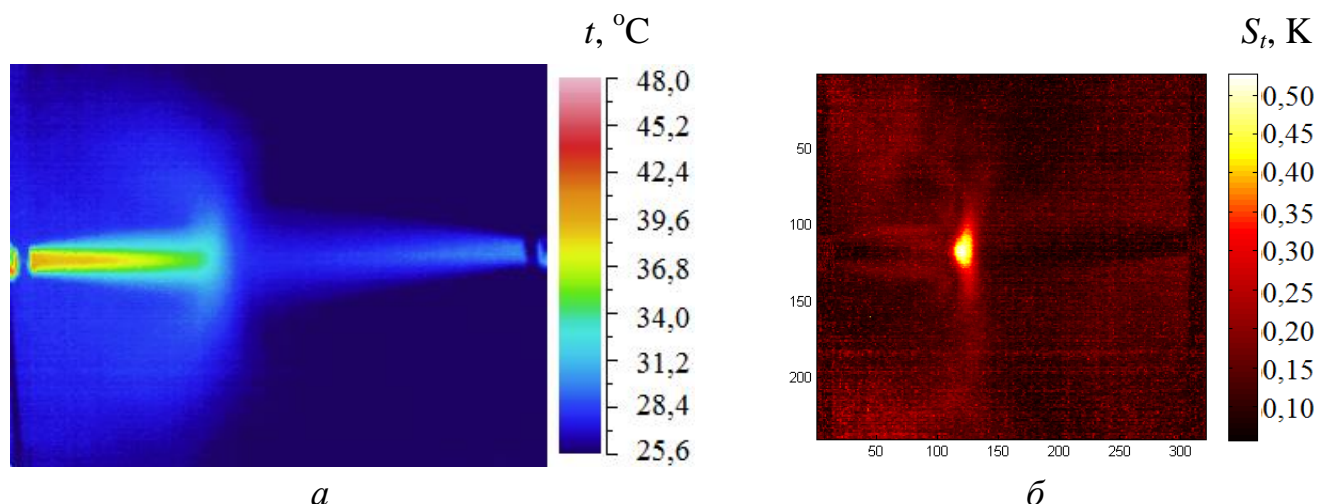


Рис. 3. Исходное тепловизионное изображение - *а* и поле стандартного отклонения температуры - *б* соударяющихся струй, скорость горячей струи (слева) $w_h = 40$ м/с, скорость холодной струи (справа) $w_c = 50$ м/с, температура горячей струи $t_h = 57$ °С, температура холодной струи $t_c = 35$ °С, температура окружающей среды $t_{oc} = 23$ °С

При изучении высокотемпературных соударяющихся потоков – *факелов* (в качестве топлива применялась пропан-бутановая смесь), использовалась установка, представленная на рис. 4. Изучались как соударяющиеся соосно, так и соударяющиеся под углом факелы, а также свободные и возмущенные горячие потоки.

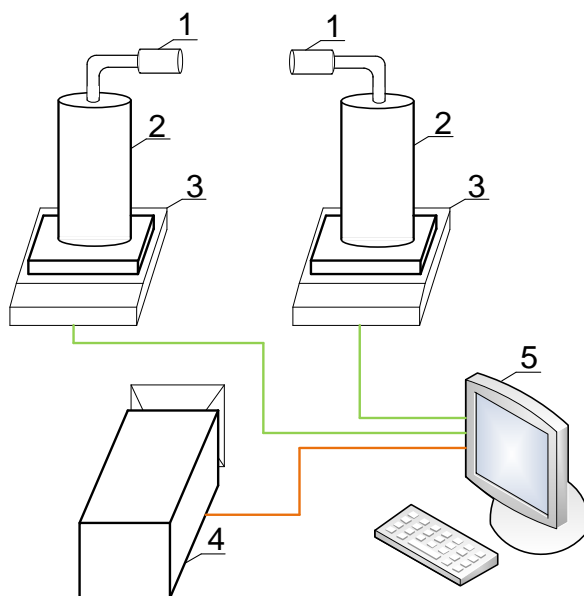


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования высокотемпературных газовых потоков: 1 – инжекционная горелка; 2 – газовый баллон; 3 – лабораторные весы; 4 – тепловизор; 5 – персональный компьютер

В экспериментах с факелами получены следующие картины распределений: *стандартного отклонения* (рис. 5,б), *частоты пульсации* (рис. 5,в) и *фазы пульсации* (рис. 5,г) температуры. Рис. 5,в показывает, что в области соударения факелов возникают зоны, состоящие из пикселей, в которых частота пульсации температуры f_m имеет одинаковые значения.

Шкала температур на исходных термограммах факела условна, что связано с трудностью оценки его степени черноты.

Было установлено, что в факелах возникают иррегулярные структурные образования. В отличие от низкотемпературных струй, в факелах наблюдается гораздо больше разновидностей когерентных образований, но более малых размеров.

Для идентификации структур в факелах, процессы в которых имеют более сложную природу (химические реакции, особый механизм существования турбулентности), была применена дополнительно методика вейвлет-анализа последовательностей термограмм. Она заключается в свертке вейвлет-функции с временным рядом изменения температуры в каждой точке термограммы.

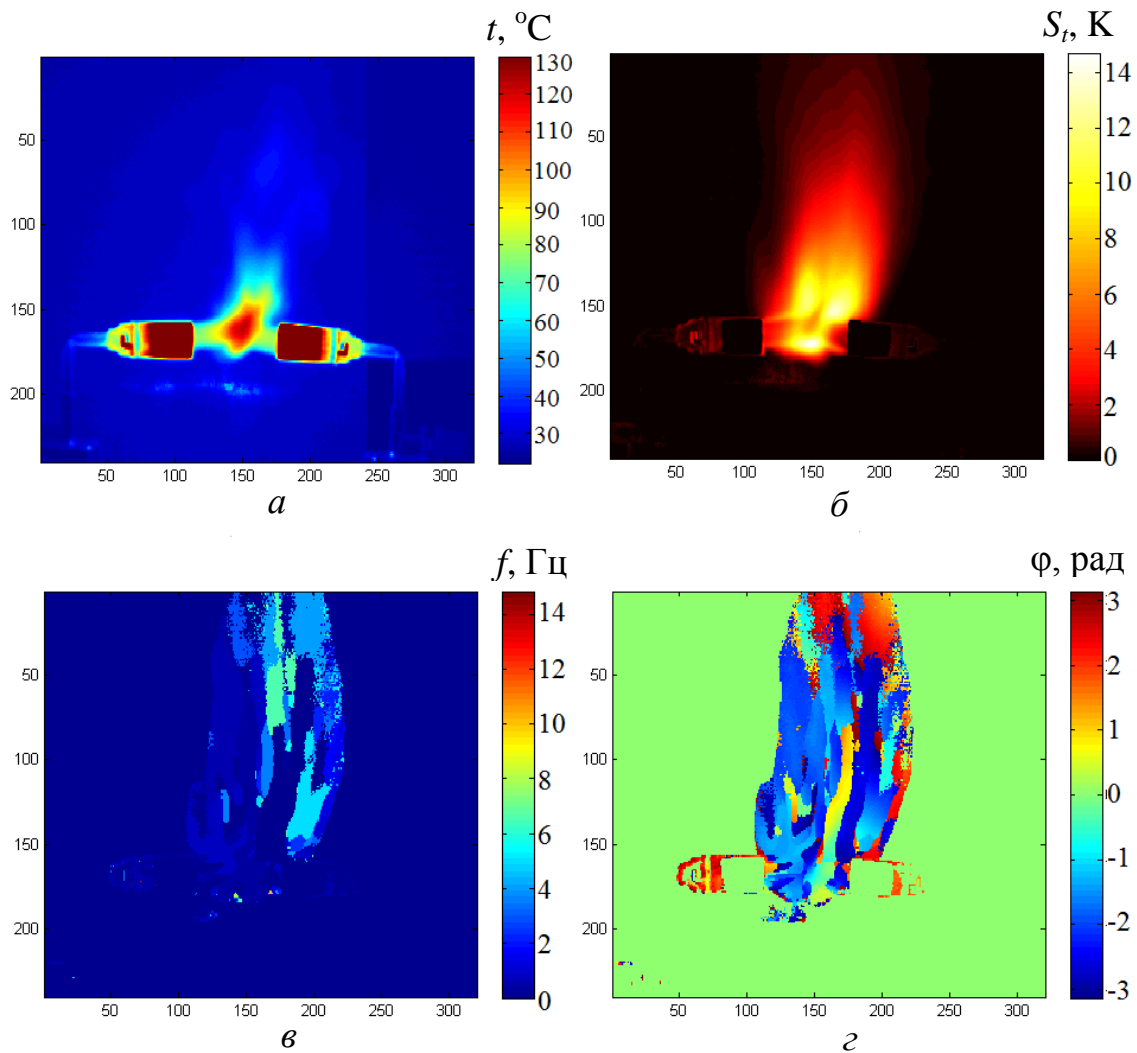


Рис. 5. Исходное тепловизионное изображение факелов - *а*, поля: S_t температуры - *б*, характерных частот пульсаций - *в*, фаз пульсаций - *г*. Инжекционная газовая горелка, диаметр сопла 16 мм (топливо - смесь: изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %, массовый расход $G_{Г1} = 2,56$ мг/с, $G_{Г2} = 4,62$ мг/с)

На рис. 6 даны примеры визуализации коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования, выполненного с использованием вейвлета Добеши.

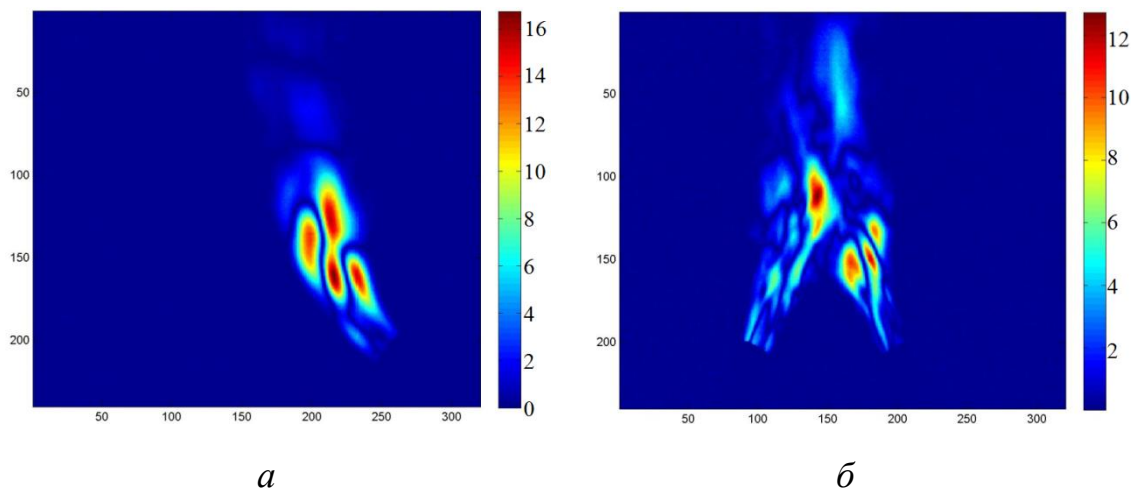


Рис. 6. Типичные результаты дискретного вейвлет анализ (вейвлет Добеши, высокие частоты) одиночного факела - *а* и взаимодействующих факелов - *б*

Совместно с дискретным преобразованием применялось также непрерывное вейвлет-преобразование, которое, в отличие от дискретного, имеет более явную физическую интерпретацию. Также для выделения характеристик течения применялся метод анализа главных компонент.

В **третьей главе** обсуждаются закономерности формирования термической структуры области соударения. Было установлено, что для низкотемпературных струй существует два основных режима тепломеханического взаимодействия, которые различаются по структуре потока. Определяющим критерием для выделения режима является безразмерная разность температур:

$$\Theta = \frac{t_h - t_c}{t_h - t_{oc}} \quad (1)$$

Обозначения к формуле (1) аналогичны подписи к рис. 3.

Первый режим наблюдается при $\Theta > 0,3$, для него характерно образование единой монозоны взаимодействия. Температурное поле для этого случая приведено на рис. 3. Второй режим взаимодействия существует при $\Theta < 0,3$, и отличается тем, что область столкновения струй дискретна. В ней существует несколько зон с максимумом S_t , что указывает на возникновение целой системы вихрей (рис. 7).

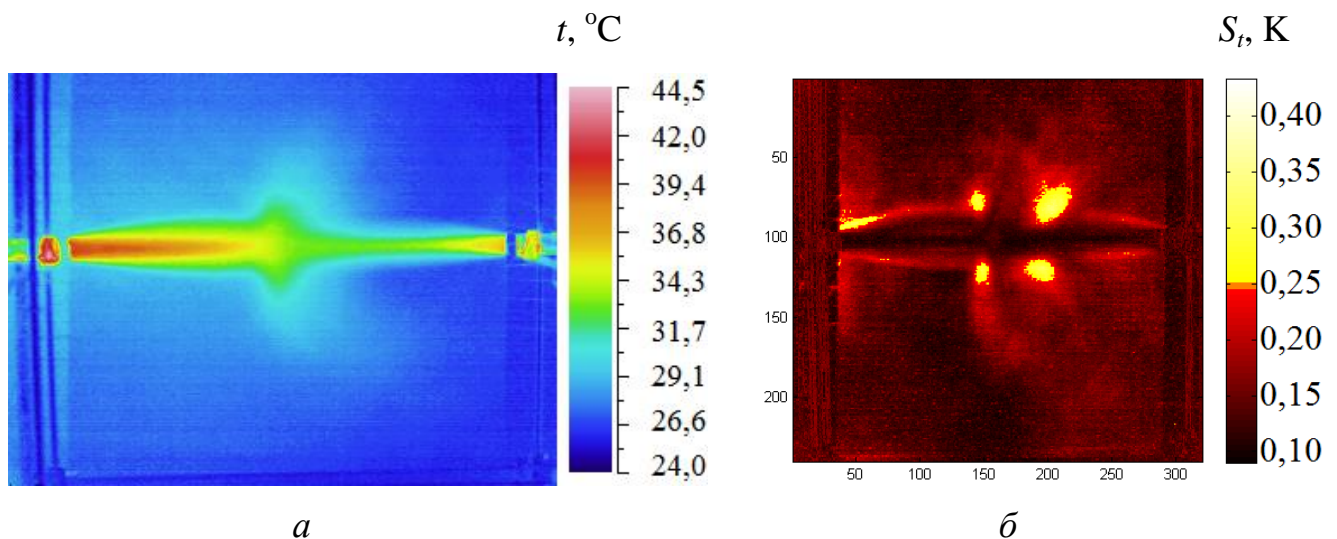


Рис. 7. Исходная термограмма - а и поле S_t - б соударяющихся струй: $w_h = 52 \text{ м/с}$, $w_c = 44 \text{ м/с}$, $t_h = 54 ^\circ\text{C}$, $t_c = 48 ^\circ\text{C}$, $t_{oc} = 23 ^\circ\text{C}$, $\Theta = 0,19$

Были выделены два частных случая первого режима взаимодействия ($\Theta > 0,3$), наступление которых определяется соотношением импульсов струй. Первый наблюдается при значении импульса горячей струи много больше

импульса холодной, в нем происходит так называемая «капсуляция» горячей струи в потоке холодной струи (рис. 8).

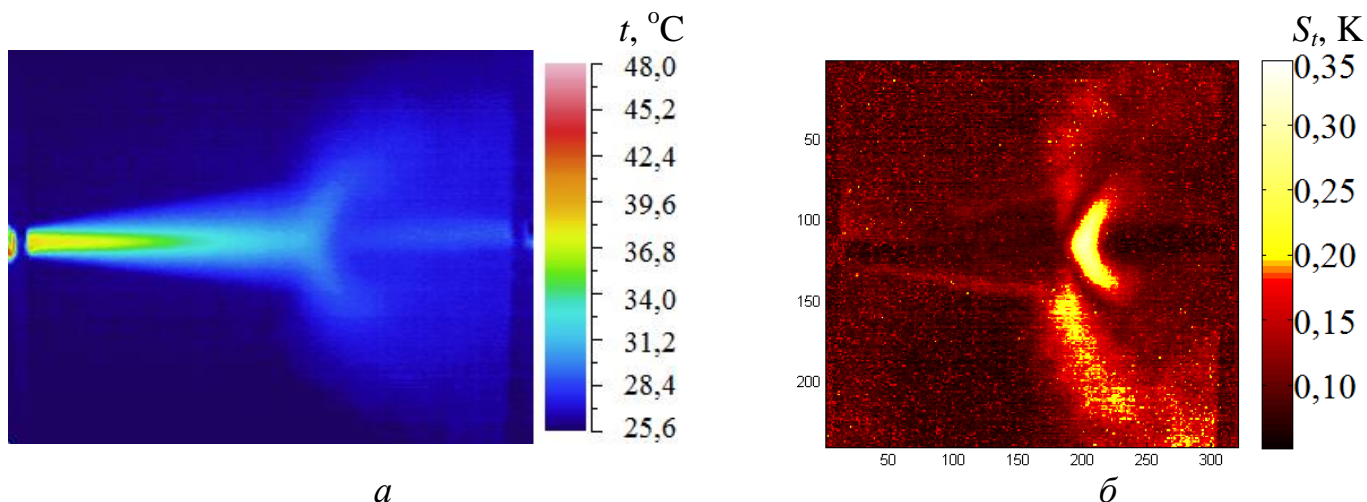


Рис. 8. Исходная термограмма - *a* и поле S_t - *б* соударяющихся струй: $w_h = 40$ м/с, $w_c = 25$ м/с, $t_h = 60$ °C, $t_c = 31$ °C, $t_{oc} = 24$ °C, $\Theta = 0,80$

Второй частный случай первого режима взаимодействия имеет место при обратном соотношении импульсов: в этом случае происходит обтекание холодной струи горячей, при этом наблюдается картина, сходная с истечением струи в тупик малой глубины. Наибольший интерес представляет строение потока на переходном (кризисном) участке.

На рис. 9 приведена термограмма и поле стандартного отклонения температуры переходного участка между режимами.

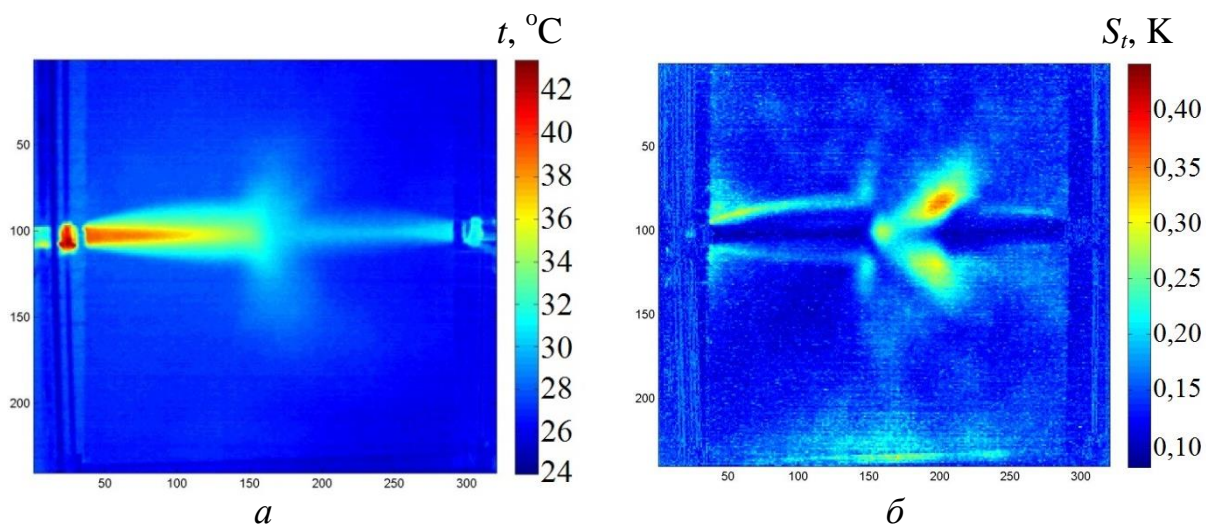


Рис. 9. Исходное тепловизионное изображение - *a* и поле стандартного отклонения температуры S_t - *б* соударяющихся струй: $w_h = 52$ м/с, $w_c = 44$ м/с, $t_h = 55$ °C, $t_c = 44$ °C, $t_{oc} = 22$ °C, $\Theta = 0,33$

При частотном анализе области взаимодействия было обнаружено, что для подавляющего числа экспериментов при существовании первого режима наблюдается характеристическая частота пульсаций температуры в области взаимодействия (рис. 10).

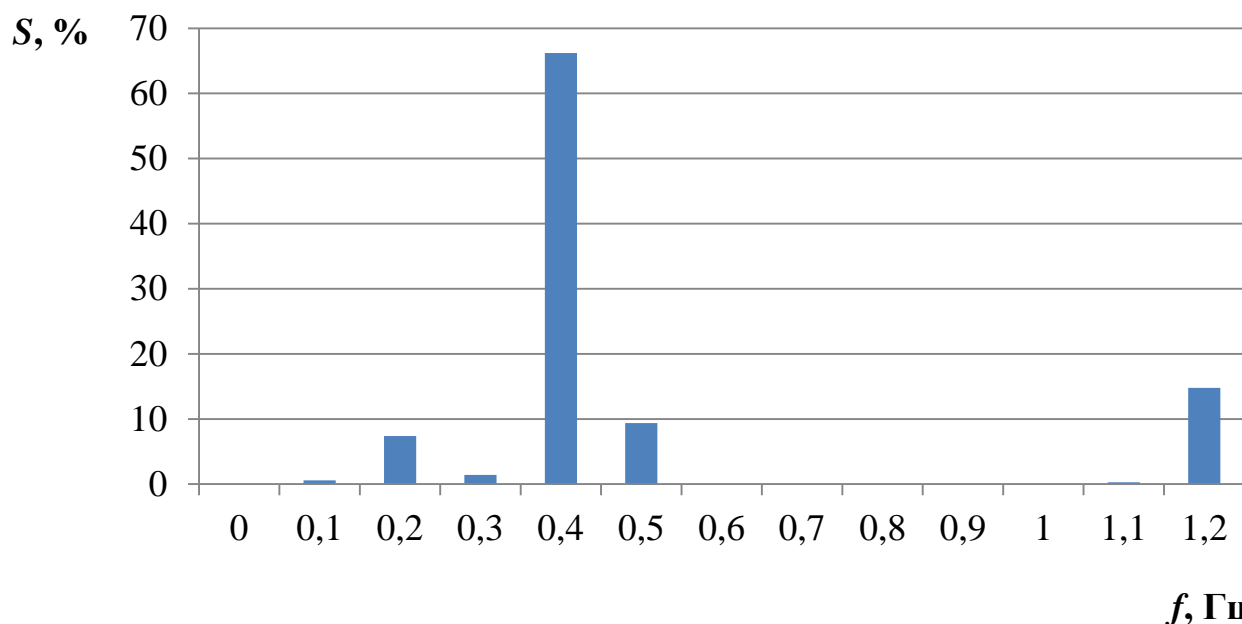


Рис. 10. Типичная гистограмма распределения доли площади с одинаковой частотой пульсаций температуры $S, \%$ области взаимодействия по частотам $f, \text{Гц}$ (для низкотемпературных потоков)

Для изучения высокотемпературных потоков (факелов) была разработана методика фазочастотного анализа последовательностей термограмм. При помощи этой методики открывается возможность вычислить не только стандартное отклонение температурного поля, но и характерную частоту пульсаций, а также фазы для характерных частот.

Поскольку поисковые эксперименты выявили существование зон, в которых температура пульсировала с одинаковой частотой, но в разных фазах (см. рис. 11), были проведены дополнительные эксперименты, с нанесением низкочастотного воздействия микроструей воздуха, создаваемой при помощи микросопла, установленного в горелке. Расход и импульс тестирующего потока воздуха был на несколько порядков меньше суммарного расхода газа в горелке и регулировался при помощи электроклапана. Частота пульсаций задавалась в программе TraceMode и варьировалась от 0,5 до 5 Гц, фаза была произвольной.

Эти опыты показали, что пульсация возмущающей микроструи формирует в факеле область, в которой температура колеблется с той же частотой. При этом возмущенная зона занимает большую часть области существования факела (рис. 12). Фазовый анализ показал, что в ней образуется не единая структура, пульсирующая в одной фазе, а набор структур, имеющих при одинаковой частоте – частоте возмущения - разные фазы колебаний.

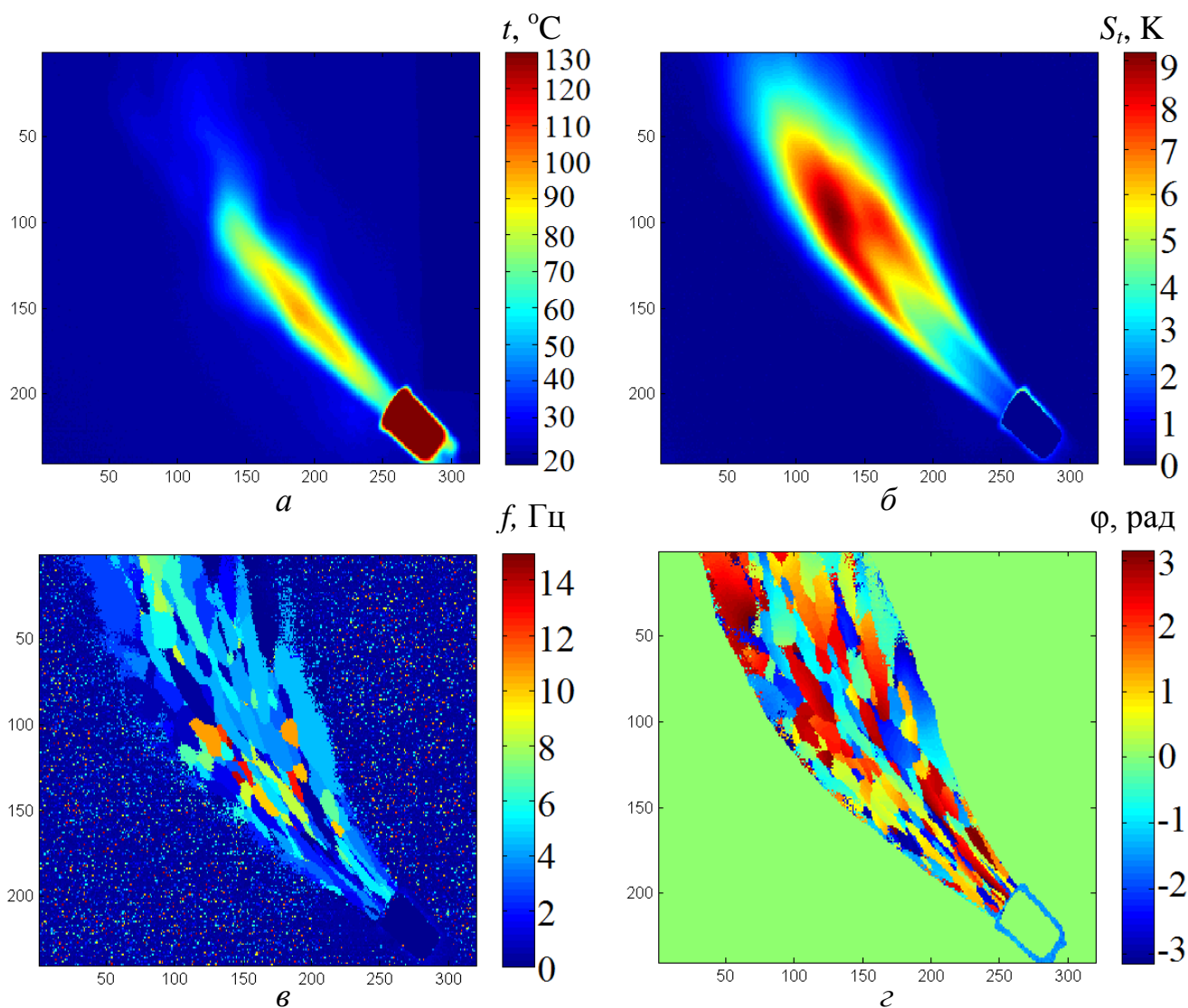


Рис. 11. Тепловизионное изображение свободного одиночного газового факела - а, стандартное отклонение температуры - б, характерные частоты пульсаций - в, фаза пульсаций - г. Инжекционная газовая горелка (топливо – смесь: изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %, $G_{\Gamma} = 0,02 \text{ г/с}$)

Наблюдения динамической картины показали, что структуры непрерывно перемещаются в зоне факела, переходя из одной области в другую, т. е. наблюдается эффект пространственно-временной перемежаемости.

Результаты обработки экспериментальных данных по соударению факелов (рис. 13) позволяют сделать заключение о том, что в этом случае происходит образование структур, пульсирующих с разной частотой. При этом также проявляется эффект перемежаемости.

На рис. 13,б видно, что образуются три области со стандартным отклонением S_t , превышающим среднюю величину по контрольной зоне.

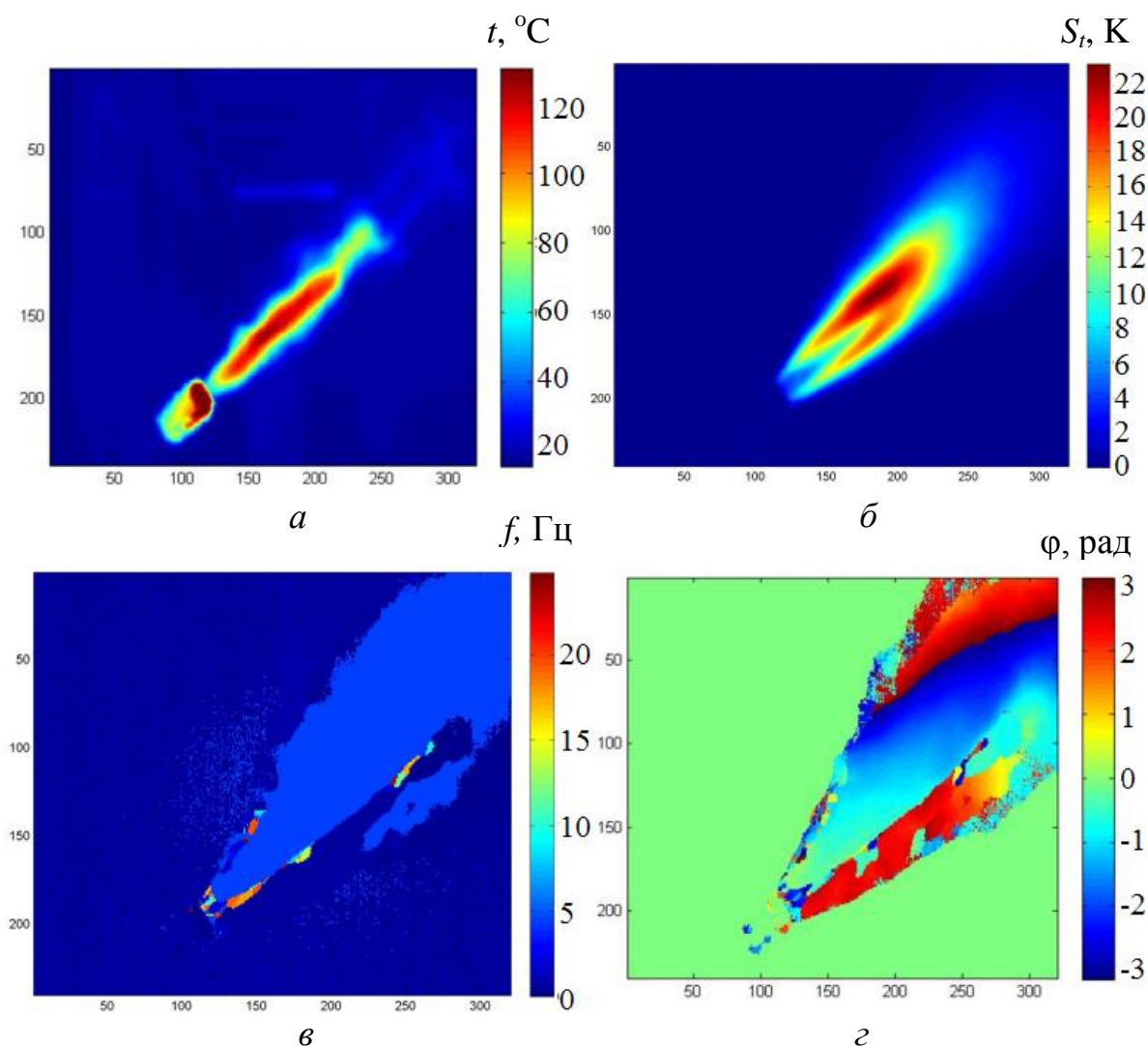


Рис. 12. Тепловизионное изображение возмущенного факела - *а*, поле стандартного отклонения S_t - *б*, распределение характерных частот пульсаций - *в*, поле фаз пульсаций - *г*. Инжекционная газовая горелка (топливо – смесь: изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %, массовый расход $G_T = 0,02$ г/с, частота возмущения $f_b = 4,5$ Гц)

Что же касается частотной картины взаимодействия высокотемпературных соударяющихся струй, то наблюдается смещение активного диапазона спектра пульсаций температуры в более низкочастотную область (см. рис. 14). При этом

происходит некоторое уменьшение площади, занимаемой структурами, пульсирующими с одинаковой частотой.

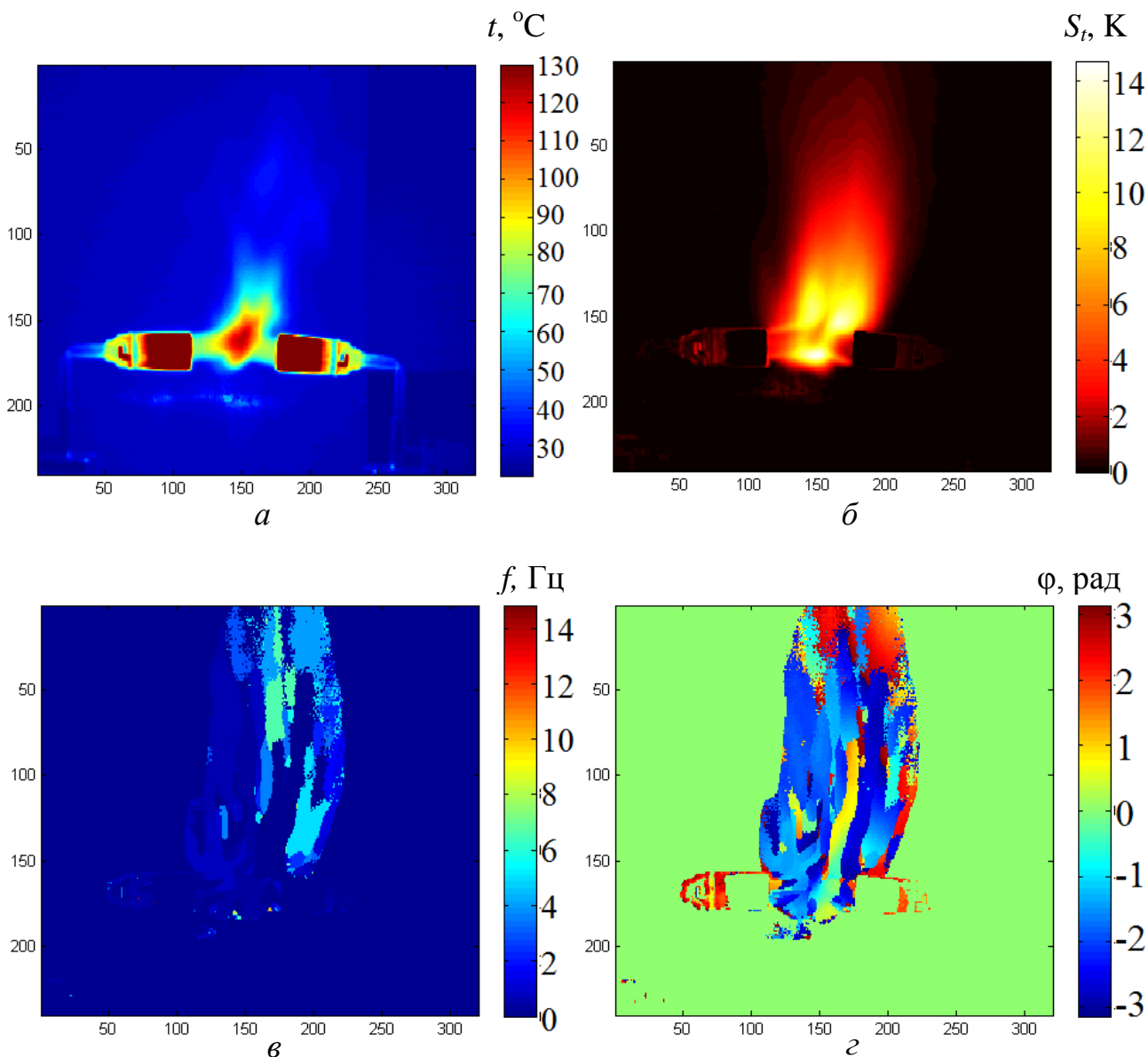


Рис. 13. Тепловизионное изображение соударяющихся соосно факелов - *а*, поля характеристик: стандартного отклонения температуры - *б*, характерных частот пульсаций - *в*, фаз пульсаций - *г*. Одинаковые инжекционные газовые горелки (топливо - смесь: изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %, $G_{Г1}=2,56$ мг/с, $G_{Г2}=4,62$ мг/с)

Для факелов совместно с преобразованием Фурье проводился вейвлет-анализ. Следует отметить, что выбор в качестве материнского вейвлета – вейвлета Морле был произведен после сравнения пилотных результатов обработки, полученных при помощи различных типов вейвлетов с результатами преобразования Фурье (см. рис. 15).

Непрерывное комплексное вейвлет-преобразование позволяет получить пространственно-временное распределение частот и фаз пульсации температуры,

что делает его более информативным, по сравнению с преобразованием Фурье. На рис. 16 приведен результат вейвлет-анализа соударяющихся соосно факелов. Наиболее информативными являются скэйлограммы и фазограммы вейвлет-преобразования. Поскольку преобразование дает пространственно-временное представление, появляется возможность проследить эволюцию структур в потоке.

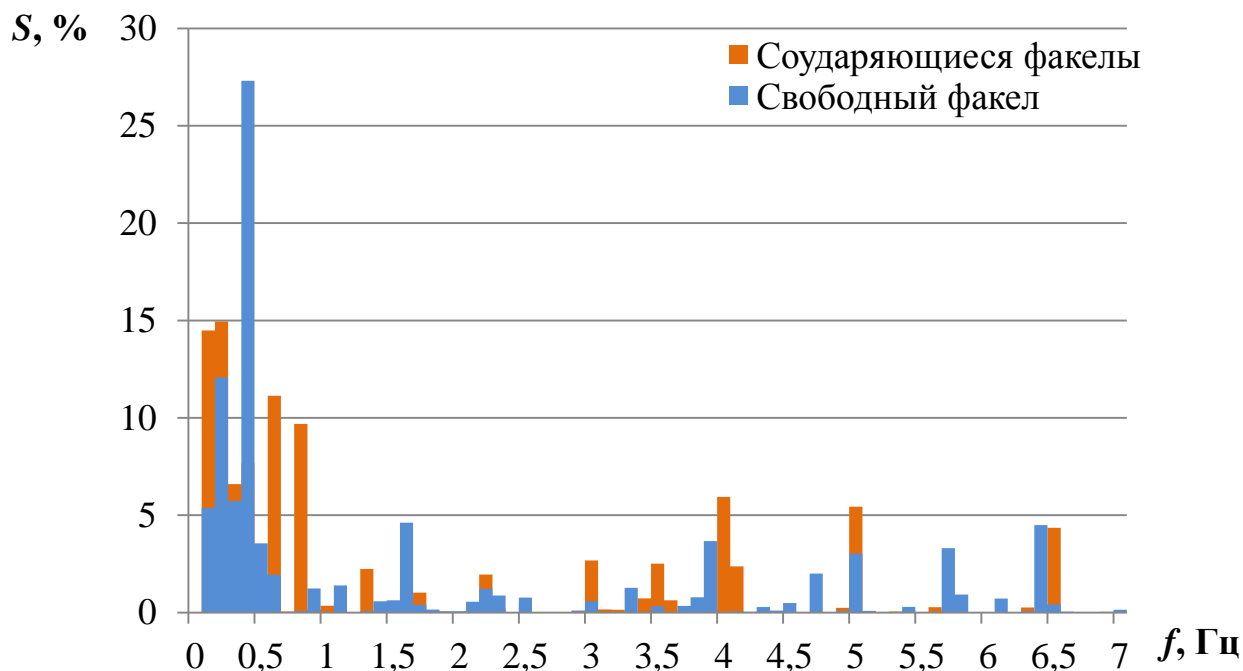


Рис. 14. Сопоставление гистограмм распределения доли площади S , %, занимаемой областями, пульсирующими с одинаковой частотой f , Гц, для одиночного факела и соударяющихся горизонтально факелов

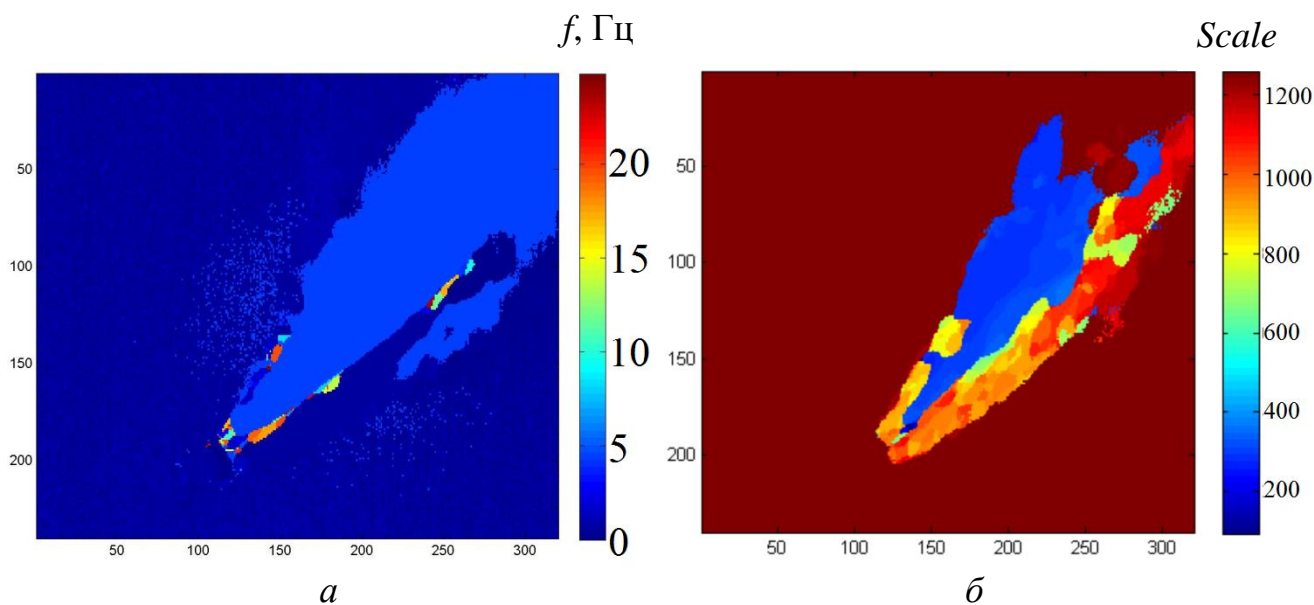


Рис. 15. Сравнение результатов преобразования Фурье - a и вейвлет-анализа возмущенного факела - b ; параметры факела аналогичны рис. 12

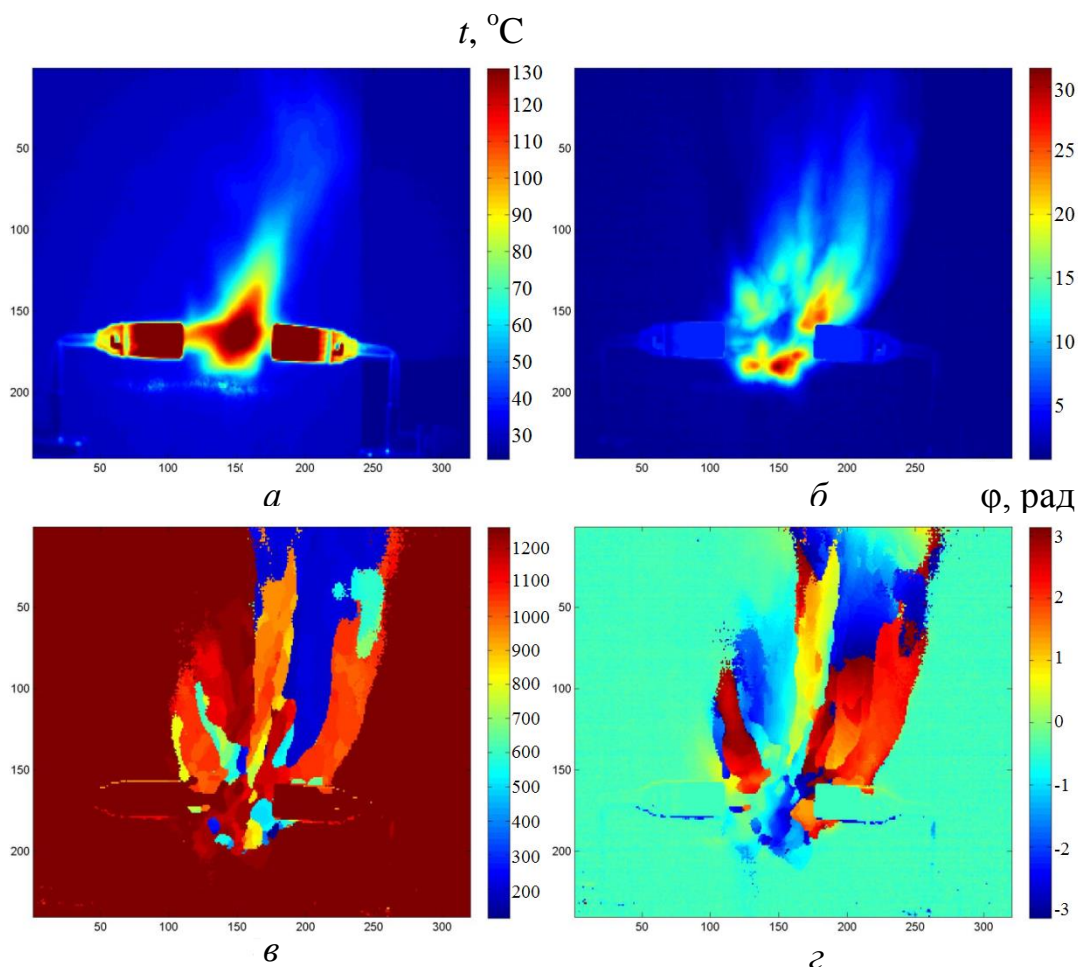


Рис. 16. Визуализация результатов вейвлет-анализа соударяющихся соосно факелов: *а* - исходная термограмма; *б* - поле амплитуд; *в* - скэйлограмма; *г* - фазограмма, *рад*. Инжекционные газовые горелки (топливо - смесь: изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %, $G_{Г1} = 17,5$ мг/с, $G_{Г2} = 28,0$ мг/с, $l/d = 5$)

Четвертая глава посвящена вопросам теплообмена. Количественная оценка теплового взаимодействия взаимопроникающих встречных струй построена на идеях, заимствованных из теории теплообмена в смешивающих аппаратах. А именно, тепловой поток Q_{1-2} , переданный от струи 1 (условно горячая) к струе 2 (условно холодная), в области взаимодействия может быть определен как:

$$Q_{1-2} = c_{p1} \cdot G_1 \cdot (t_1 - \bar{t}_c) = c_{p2} \cdot G_2 (\bar{t}_c - t_2), \quad (2)$$

где c_{p1} , c_{p2} – массовые изобарные теплоемкости среды соответственно струи 1 и струи 2, Дж/(кг·К);
 G_1 , G_2 – их массовые расходы, кг/с;
 t_1 , t_2 – исходные температуры струй, К;
 \bar{t}_c – средняя (среднеарифметическая) по площади зоны взаимодействия температура среды, К. Индексы: 1 – *h*, 2 – *c*.

Введем понятие среднего поверхностного коэффициента теплового взаимодействия струй K_F , Вт/(м²·К), определяемого как:

$$K_F = \frac{Q_{1-2}}{(t_1 - t_2) \cdot F}, \quad (3)$$

где F – условная площадь поверхности зоны взаимодействия, м²;
 t_1, t_2 – исходные температуры струй 1 и 2, К;
 Q_{1-2} – тепловой поток, Вт.

Площадь поверхности зоны взаимодействия F определялась следующим образом: для симметричной системы по границе области соударения строилась фигура вращения, ось которой совпадала с осью соударяющихся струй. Площадь фигуры вычислялась как длина окружности с радиусом, равным расстоянию по вертикали от оси до границы зоны соударения.

Для обобщения данных по тепловому взаимодействию была введена безразмерная интенсивность теплового взаимодействия LN :

$$LN = \frac{K_F \cdot L}{\lambda_c}, \quad (4)$$

где L – определяющий линейный размер – периметр продольного сечения зоны взаимодействия, м;
 λ_c – коэффициент теплопроводности среды в зоне смешения, Вт/(м·К).

Коэффициент теплопроводности среды λ_c определялся при температуре \bar{t}_c .

Число Рейнольдса для струи газа вычислялось стандартным образом:

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu}, \quad (5)$$

где ω – скорость струи м/с;
 d – диаметр сопла, м;
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

На рис. 17 приведена зависимость LN от числа Рейнольдса условно холодной струи $LN = f(Re_c)$.

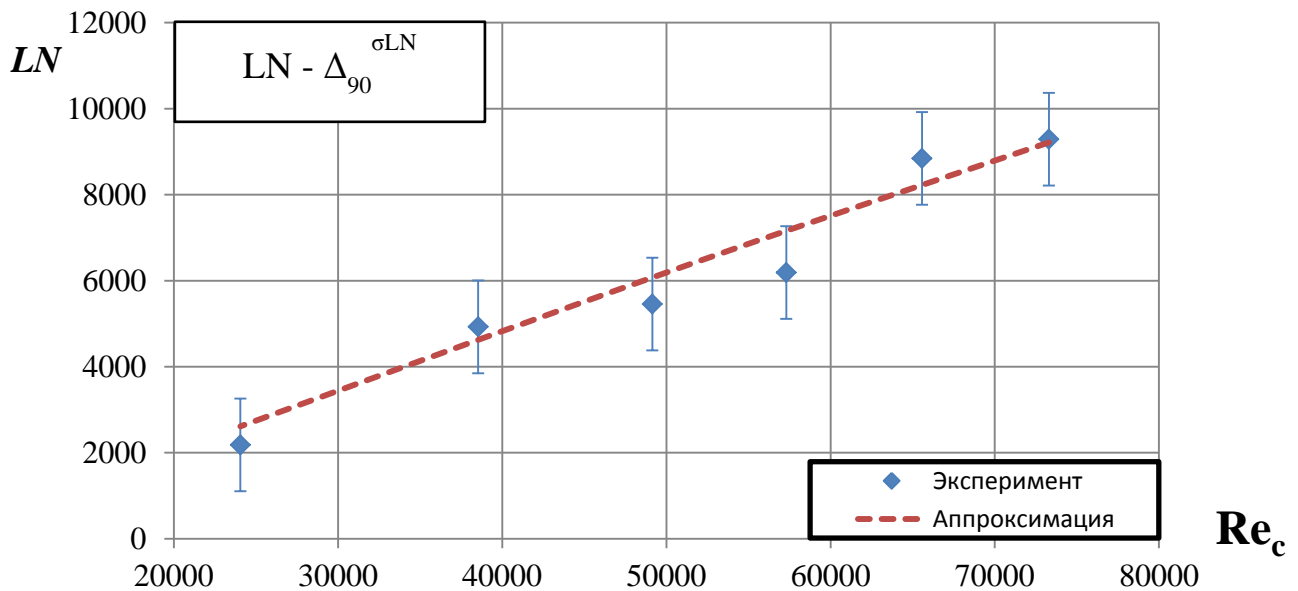


Рис. 17. Зависимость безразмерной интенсивности теплового взаимодействия LN от числа Рейнольдса Re_c холодной струи

Для диапазона режимов, наиболее важных для промышленных технологий, в результате аппроксимации данных по теплообмену методом наименьших квадратов были получены со среднеквадратичным отклонением в 8 % следующие зависимости:

$$LN = 0,224 \cdot Re_c^{0,86} \cdot Re_h^{0,3} \cdot \left(\frac{p_h}{p_c} \right)^{0,1} \cdot \Theta \cdot \left(\frac{l}{d} \right)^{-0,5}, \quad (6)$$

Область применения уравнения:

$$\begin{aligned} Re_h &= 30 \cdot 10^3 \dots 80 \cdot 10^3 \\ Re_c &= 30 \cdot 10^3 \dots 80 \cdot 10^3 \\ \Theta &= 0,2 \dots 0,9 \\ l/d &= 10 \dots 40 \\ p_h/p_c &= 0,2 \dots 4,0 \end{aligned}$$

Для оценки концентрации тепловой энергии в зоне взаимодействия высокотемпературных потоков был применен коэффициент локальной теплонапряженности K_r :

$$K_r = \frac{q_{\text{факт}}}{q_{\text{норм}}}, \quad (7)$$

где $q_{\text{факт}}$ – фактическая теплонапряженность, Вт/м³;
 $q_{\text{норм}}$ – нормативная теплонапряженность, Вт/м³.

При этом фактическая теплонапряженность определялась следующим образом:

$$q_{\text{факт}} = \frac{Q_P^H \cdot G_{\text{газа}}}{V_{\text{з.в.}}}, \quad (8)$$

где Q_P^H – низшая рабочая теплота сгорания газовой смеси, МДж/кг;
 $G_{\text{газа}}$ – суммарный массовый расход газовой смеси, кг/с;
 $V_{\text{з.в.}}$ – объем зоны соударения струй, м³.

Нормативное значение теплонапряженности было принято из справочных данных $q_{\text{норм}} = 200 \text{ кВт/м}^3$.

Обобщение экспериментальных данных дало для K_r следующую зависимость:

$$K_r = 32,9 \cdot 10^{-3} \cdot Q^{0,64} \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{0,92} \quad (9)$$

Точность аппроксимации по K_r составляет 12 %. Область применения уравнения: $Q - 300 \dots 2500 \text{ Вт}$; $l/d - 3 \dots 10$.

Поскольку для вычисления теплового потока при турбулентном теплопереносе необходимо определить коэффициент турбулентной теплопроводности среды λ_t , который найти достаточно сложно (общепринятой методики для этого не создано), для оценки распределения теплового потока представляется целесообразным ввести понятие «термонапряженность потока» \vec{t}_s , под которой понимается величина движущего фактора теплопереноса, «усилия» теплопереноса при $\lambda_e = 1$, $t_s = \text{grad}(t)$. Введение \vec{t}_s позволяет выяснить, какие когерентные структуры способствуют теплопереносу в турбулентных потоках, провести сопоставительный анализ движущих сил теплопереноса в различных областях потока.

На рис. 18 приведены 3D-визуализация поля температур и поле термонапряженности потока.

Обращает на себя внимание тот факт, что в центре области соударения факелов не наблюдается какого-либо значительного термонапряжения. Следовательно представляется вполне правомерным усреднять температуру в области соударения, потому как даже в высокотемпературных потоках – факелах в этой области не наблюдается какого-либо значительного градиента температуры.

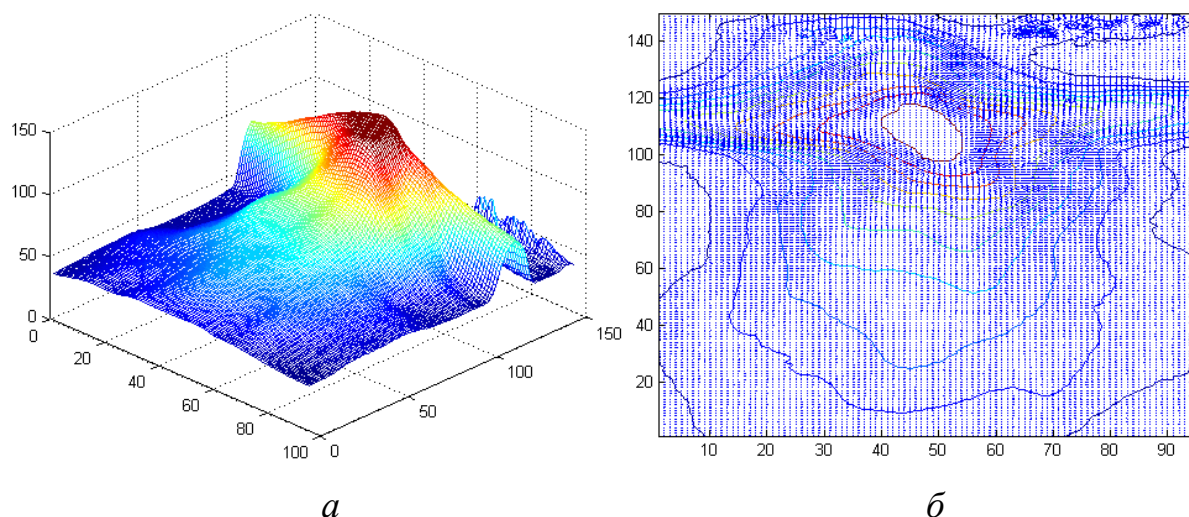


Рис. 18. 3D–визуализация поля температур - *а* и поле термонапряженности потока - *б* соударяющихся соосно факелов. Инжекционные газовые горелки (топливо – смесь: изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %, $G_{Г1} = 17,5$ мг/с, $G_{Г2} = 28,0$ мг/с, $l/d = 5$)

В **пятой главе** даны практические рекомендации по применению полученных результатов при разработке систем автоматизированного управления технологическими процессами. Автором была разработана система контроля положения области соударения (Патент РФ №129230). Система позволяет: производить анализ температурного поля и определение положения области соударения струй; структурную идентификацию этой зоны; управление местоположением зоны соударения газовых струй и контроль поля температур рабочего пространства технологического оборудования с целью обнаружения зон (потоков) с аномальной температурой. Принципиальная схема системы управления приведена на рис. 19.

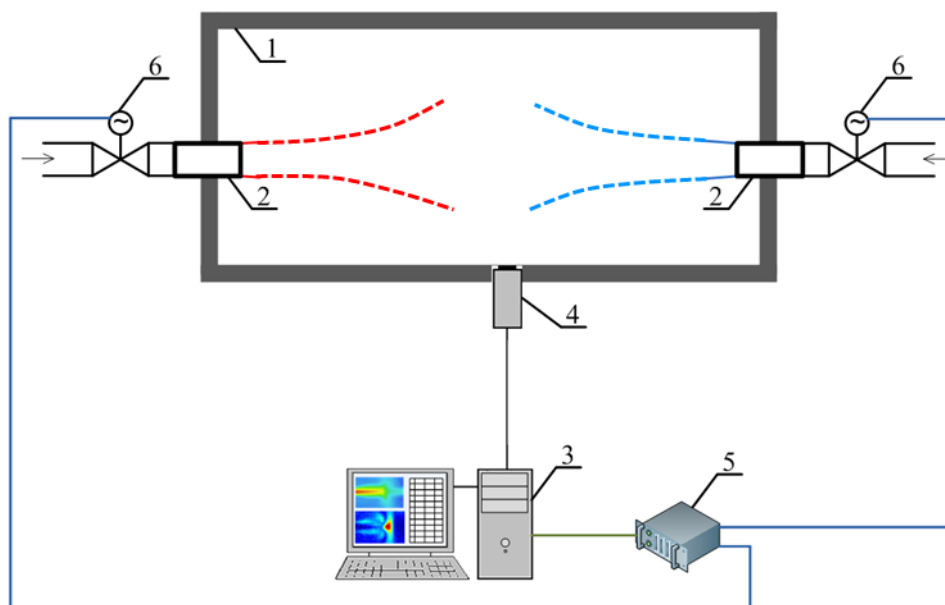


Рис. 19. Принципиальная схема системы управления положением области соударения газовых струй: 1 - технологическая поверхность; 2 - направляющий аппарат; 3 - вычислительная машина; 4 - тепловизионная камера, 5 - контроллер, 6 - клапан с электроприводом

Также была разработана и создана установка для определения наличия, границ и положения факела в рабочем пространстве. Работоспособность подобной системы стала возможной за счет авторского алгоритма ускорения процесса обработки данных, получаемых от тепловизора. Суть алгоритма управления сводится к вычислению стандартного отклонения поля температур исследуемой области, далее полученная величина сравнивается с заданным пороговым значением для этой области и формируется соответствующее управляющее воздействие.

Частотные методы воздействия на факелы, которые заключаются в нанесении низкочастотного воздействия на факел при помощи микроструй, в этой работе были реализованы в виде системы управления структурой факела. При этом с целью выявления структурных образований в факеле и характерных для них частот пульсаций температуры применяется способ тепловизионного сканирования топочного пространства, после чего наносится направленное воздействие для подавления негативного влияния этих образований. Преимуществом разработанной системы является выделение разрушительных частот в факеле, что является необходимым для обеспечения стабильности процесса горения и предотвращения разрушений промышленного агрегата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных и комплекс проведенных исследований позволяют сделать вывод о перспективности использования разработанной полевой методики для идентификации термической структуры и определения характеристик теплового взаимодействия соударяющихся газовых потоков, а также для разработки методов управления технологическими процессами, построенными на встречных газовых струях.

Получены следующие основные результаты:

1. Разработан полевой метод идентификации структуры течения газовых потоков с помощью тепловизора.
2. Обнаружены термомеханические режимы взаимодействия соударяющихся потоков, значительно отличающиеся по структуре течения в области столкновения.
3. Выявлено, что режим взаимодействия зависит определяющим образом от безразмерной разности температур соударяющихся струй.
4. Разработаны методы количественной оценки интенсивности теплообмена между соударяющимися низкотемпературными газовыми струями и анализа его «термонапряженности».
5. Предложена методика численной оценки локальной теплонапряженности системы взаимодействующих факелов.
6. Создана методика фазо-частотного быстродействующего анализа структуры взаимодействующих факелов.
7. На основе полученных сведений была разработана промышленная методика установления границ факела на фоне технологической поверхности и распознавания его внутренней структуры, для реализации которой создана концепция автоматизированной системы управления, а также написана программная реализация алгоритма идентификации.
8. Для системы автоматизированного управления положением области взаимодействия газовых струй была создана опытная установка для определения геометрических координат области взаимодействия и управления ее местоположением в рабочем пространстве технологического агрегата, конструктивное исполнение которой защищено патентом РФ на полезную модель.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Миренский В.Ю., Худяков П.Ю. Тепловизионная идентификация турбулентных структур в газовых потоках // Приборы и техника эксперимента. 2010 №1. С. 155–158.
2. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю., Алексеев С.Г. Применение тепловизионного метода для обнаружения очагов пламенного горения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 4. С. 38–40.
3. Ефимова А.В., Жилкин Б.П., Шевелёв М.М., Зайков Н.С., Худяков П.Ю. Тепловизионная идентификация структуры турбулентной воздушной струи при ее взаимодействии с приемником потока // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 4. С. 87–90.
4. Дордж Д., Зайков Н.С., Зыскин Б.И., Кисельников А. Ю., Худяков П.Ю. О применении видео- и тепловизионного контроля для управления топочными процессами в энергетических котлах // Электрические станции. 2012. №10. С. 34 – 35.
5. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю. Особенности изменения термической структуры газовых импактных струй // Механика жидкости и газа. 2013. №2. С. 104 – 111.
6. Zhilkin B.P., Zaikov N.S., Kisel'nikov A.Yu., Khudyakov P.Yu. Distinctive features of variation in the thermal structure of impinging gas jets // Fluid Dynamics. March 2013. Volume 48. Issue 2. pp 232–238.
7. Zhilkin B.P., Zaikov N.S., Kisel'snikov A.Y., Mirenskii V.Y., Khudyakov P.Y. Thermal imaging identification of turbulent structures in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2010. V. 53. № 1. P. 143–146.

Прочие публикации и работы:

8. Худяков П.Ю., Дордж Д., Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю. Применение тепловизионных технологий для управления топочными процессами в энергетическом оборудовании // Сборник докладов XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность», 3 – 7 декабря 2012 г. Томск: ТПУ. 2012. С. 137 – 139.

9. Худяков П.Ю., Берг И.А., Мелкозеров Н.А., Жилкин Б.П. Структурная диагностика факела в реальном времени как основа создания современных систем управления. Сборник докладов VIII международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ-2013», 24 – 25 апреля 2013 г. Иваново: ИГЭУ. 2013. С. 191 – 195.

10. Пат. 129230 РФ. Система управления положением зоны соударения газовых струй и контроля поля температуры струй / Худяков П.Ю., Жилкин Б.П., Дордж Д., Зайков Н.С.; Заявл. № 2013101516/28 от 10.01.2013, опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17. С. 2.

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

Плоская печать

Усл. печ. л. 1,63

Уч.-изд. л. 1,5

Тираж 100

Редакционно-издательский отдел ФГАОУ ВПО
«УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
Ризография НИЧ ФГАОУ ВПО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н.Ельцина»
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19